

# 光学学报

## 在纤式回音壁模式微球谐振腔及其传感特性

殷琦寓<sup>1,3</sup>, 蔡露<sup>1,3\*</sup>, 李尚文<sup>1,3</sup>, 赵勇<sup>1,2,3\*\*</sup>

<sup>1</sup>东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

<sup>2</sup>东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

<sup>3</sup>东北大学秦皇岛分校河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 提出一种在纤式回音壁模式微球谐振腔, 并对其温度和折射率传感特性进行研究。首先, 分析了不同尺寸的微球腔与光纤结构耦合时的相位匹配情况, 以锥形光纤为探针来拾取并移动钛酸钡微球, 将其嵌入空心光纤, 形成在纤式谐振腔结构, 从而在微球中激发回音壁模式, 并与空心光纤端面的反射光相互作用, 产生法诺共振。实验结果表明, 激发的法诺共振峰曲线的斜率高达  $-99.3 \text{ dB/nm}$ 。另外, 通过实验证明了此结构对温度和折射率均具有较好的传感特性, 灵敏度分别为  $26.8 \text{ pm/}^\circ\text{C}$  和  $-244.97 \text{ dB/RIU}$ 。该谐振腔性能稳定、结构紧凑、加工简单, 在纤式的反射结构使其有望在复杂的传感环境中发挥作用。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 在纤式; 回音壁模式; 微球腔

中图分类号 TN253 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221288

### 1 引言

2002年,英国学者 Vollmer等<sup>[1]</sup>第一次研究了回音壁模式(WGM)微腔传感器。WGM传感器由于具有微小的模式体积和较高的品质因子(Q值)等优点,在多种物理量的高灵敏传感领域<sup>[2-3]</sup>有所应用。目前,WGM微腔已经在窄线宽滤波器<sup>[4-5]</sup>、传感器<sup>[6-7]</sup>、低阈值激光器<sup>[8-10]</sup>、无源器件<sup>[11-12]</sup>和非线性效应<sup>[13-14]</sup>等方面展现出良好的应用前景。WGM微腔的工作原理是:通过波导的光在倏逝波作用下耦合进入微腔,在腔内以全面反射形式传播,当满足相位匹配条件时,微腔内形成稳态的谐振模式<sup>[15-16]</sup>。目前常见的激发WGM的耦合方法有棱镜<sup>[17]</sup>耦合、锥形光纤<sup>[18]</sup>耦合和光纤端面耦合<sup>[19]</sup>。棱镜耦合的缺点主要是系统体积庞大,如果想减小系统的体积,就需要搭建较为复杂的系统结构,因此不容易为传感领域所用。锥形光纤耦合的方式最常见,耦合效率可以达到99%,但是锥形光纤的纤腰直径太小,有效纤腰直径要小于 $2 \mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>才会有效激发WGM,这就使得光纤的整体结构易折易碎。利用锥形光纤来激发WGM时,在耦合过程中会出现结构不稳定、材料易磨损等情况。光纤端面耦合效率较低,稳定性较差,对于耦合角度的控制较为困难。与此同时,上述常见方法都有一个共同的缺点,那就是需要精确

地对齐微球与相关组件,这在许多实际传感应用中是很难实现的。

目前,为了实现简单稳定的耦合,学者们提出一种在纤式光纤耦合方法,即将微球固定在光纤端部的楔形腔内或光纤内部的微孔结构中,例如:在制作光纤结构时,使用嵌入式双芯空心光纤(EDCHF)来将单模光纤(SMF)中的光耦合到嵌入式微球<sup>[21]</sup>,该结构中的两根锥形光纤能够将微球完全包覆在纤维中;还可以采用多模光纤(MMF)与空心光纤(HCF)相熔接的方法<sup>[22]</sup>,然而,MMF对于环境扰动十分敏感,这就会导致反射光谱不稳定。与此同时,光从MMF耦合到HCF的多个模式之间可能会存在一定的干扰,从而加剧光谱的不稳定性。针对光子晶体光纤(PCF)的多孔结构呈几何分布的特点,PCF的孔直径有所不同,因此可以将合适大小的微球嵌入尺寸相匹配的孔内,即将聚苯乙烯小球插入悬浮芯光纤孔内,以实现在纤式WGM耦合和输出<sup>[23]</sup>;或者在光纤微结构的末端粘结微球<sup>[24-25]</sup>,当微球与光纤结构之间的角度合适时,就会激发WGM。利用这些方法不仅可以缩小传感器结构的体积,还可以增强结构的鲁棒性。

本文提出一种在纤式WGM微球谐振腔,由SMF和HCF熔接而成,其中HCF的内径较小,在腐蚀之后光纤端面反射的光强相对较大,能够有效地提高反射

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-06-23; 录用日期: 2022-07-04; 网络首发日期: 2022-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61803076)、河北省高等学校科学技术研究项目重点项目(ZD2020406)、教育部中央高校基本科研业务费(N2123011)

通信作者: \*cailu@neuq.edu.cn; \*\*zhaoyong@ise.neu.edu.cn

光谱的稳定性。首先,理论分析了法诺共振形态的产生及其影响因素,并在实验中得到与理论基本相符的法诺线型,其斜率可达 $-99.3 \text{ dB/nm}$ 。其次,实验探究了此谐振腔的温度和折射率传感特性,得到的温度传感灵敏度和折射率灵敏度分别为 $26.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $-244.97 \text{ dB/RIU}$ ,线性度良好。

## 2 工作原理与共振特性分析

### 2.1 器件结构与原理

图 1(a)为在纤式 WGM 微球谐振腔的三维结构示意图,该结构由 SMF、HCF 和钛酸钡微球谐振腔组成。HCF 经过腐蚀,形成圆锥体空腔。光源发出的光入射进 SMF,随后在熔接塌陷处耦合进 HCF。如图 1(b)所示,光在 HCF 中继续传输,其中一部分会沿光纤壁传输进而耦合到微球内部,形成 WGM,并重新耦合回 HCF;另一部分光会继续向前传输至 HCF 端面,在端面处发生反射。

该谐振器为反射式结构,在 HCF 端面反射回来的光与重新耦合进 HCF 的 WGM 相互作用。微球中的 WGM 为离散束缚态,光纤端面反射回来的光为连续态,满足法诺共振产生的理论条件<sup>[26]</sup>,在适当的结构参数下,即可发生法诺共振。

### 2.2 理论与仿真分析

对于微球嵌入光纤内部的在纤式结构来说,光在传播和耦合过程中的损耗较大,因此,选取合适的光纤参数来降低损耗非常重要。另外,当光纤结构与微球

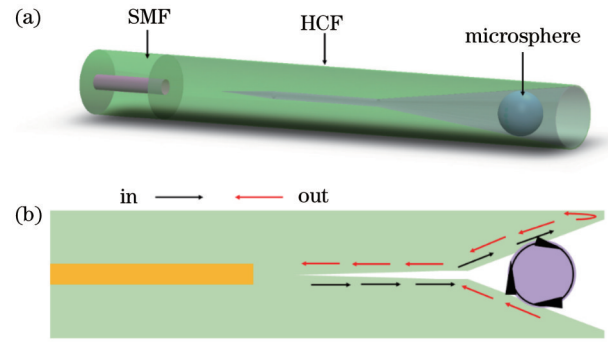


图 1 在纤式 WGM 微球谐振腔结构和光路示意图。(a)结构示意图;(b)光路示意图

Fig. 1 Structural diagram of in-fiber WGM microsphere resonator and lightpath schematic. (a) Structural diagram; (b) lightpath schematic

之间的相位匹配时才会产生 WGM,即光纤中的光传播常数 $\beta_i$ 和微球中 WGM 的传播常数 $\beta_m$ 相匹配。对于一个确定的光纤结构,只有将与之相匹配的微球嵌入其中,才能够很好地激发 WGM,因此要计算相位匹配时的微球参数。用光束传播法建立光纤仿真模型,当入射光波长为 $1550 \text{ nm}$ 时,该结构中的光场分布如图 2(a)所示。可以看出,在 SMF 与 HCF 熔接处,基模耦合进 HCF 壁中,并激发多个模式,形成干涉图样。计算不同内径的 HCF 端面反射光强,结果如图 2(b)所示。可以看到,当光纤长度相等时,HCF 内径越小,其端面反射的光强越大,因此实验中将选取较小内径( $5 \mu\text{m}$ )的 HCF。

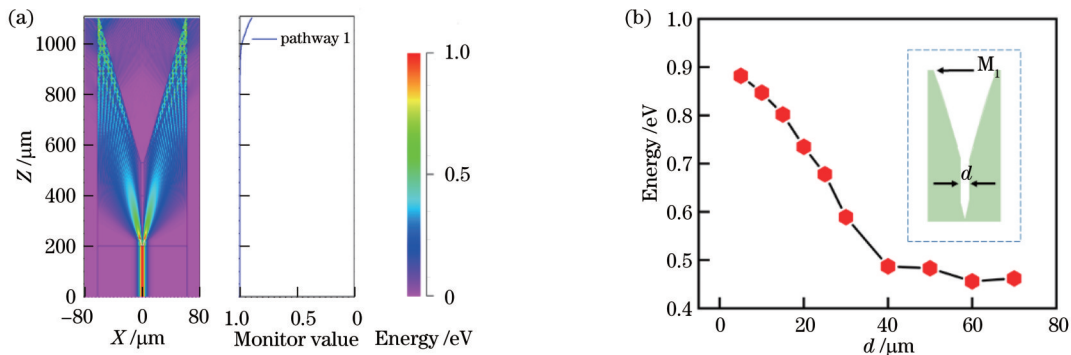


图 2 光纤结构的光场路径传播模拟和空心光纤端面 $M_1$ 处反射光强与光纤内径 $d$ 的关系。(a)光路模拟仿真;(b) $M_1$ 端面的反射光强度与 HCF 内径 $d$ 的关系

Fig. 2 Lightpath simulation of optical fiber structures and the relationship between reflected light intensity of hollow core fiber end face  $M_1$  and inner diameter  $d$  of the fiber. (a) Lightpath simulation; (b) reflected light intensity on the end face  $M_1$  versus inner diameter  $d$  of the HCF

在仿真过程中,HCF 的腐蚀深度设置为 $550 \mu\text{m}$ ,剩余端面的壁厚设置为 $3 \mu\text{m}$ ,之后计算前九阶模式的传播常数,如图 3(a)所示,插图为各模式横截面上的电场分布图。可以看出,内径为 $5 \mu\text{m}$ 时 HCF 中光的传播常数在 $5.925$ 左右,各模式间传播常数差距较小。

对于微球结构,在微腔中激发 WGM 的传播常数<sup>[27]</sup> $\beta_m$ 可表示为

$$\beta_m = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{l}{X_{nl}}, \quad (1)$$

式中: $\lambda$ 为 WGM 的谐振波长; $n$ 、 $l$ 分别为 WGM 的径向模式数和角向模式数; $n_{\text{eff}}$ 为模式有效折射率。将 $X_{nl}$ 定义成 WGM 的尺寸参数,它是一个与模式数 $n$ 、 $l$ 和微球半径 $R$ 有关的参量,其具体的表达式为

$$X_{nt} = \frac{1}{n_s} \left[ v + \zeta_n \left( \frac{v}{2} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{mp}{\sqrt{m^2 - 1}} + \frac{3\zeta_n^2}{2^{\frac{2}{3}} \times 10} v^{-\frac{1}{3}} - \frac{m^3 p \left( \frac{2p^2}{3} - 1 \right) \zeta_n}{2^{\frac{1}{3}} (m^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} v^{-\frac{2}{3}} \right], \quad (2)$$

式中： $n_s$ 为微球腔折射率； $n_a$ 为周围介质折射率； $m = n_s/n_a$ 为相对折射率比； $v = l + 1/2$ ； $\zeta_n$ 为艾里函数的第  $n$  个零点值<sup>[27]</sup>；TE 和 TM 模式对应的  $p$  值分别为  $p_{TE} = 1$  和  $p_{TM} = 1/m^2$ 。

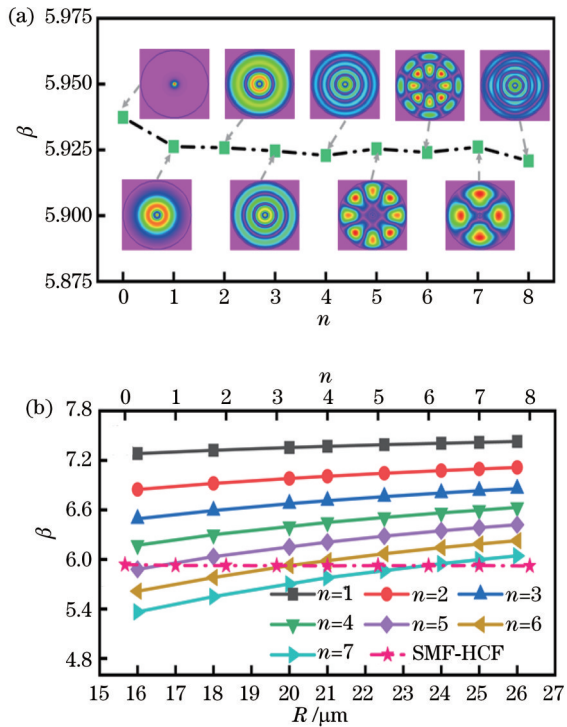


图 3 光纤结构在不同径向模数下的传播常数和光纤结构与微球的传播常数匹配关系。(a) 光纤结构在不同径向模数下的传播常数；(b) 光纤结构与微球的传播常数匹配关系  
Fig. 3 Propagation constants of optical fiber structure with different radial mode numbers and the relationship between propagation constants of optical fiber structure and microsphere resonator. (a) Propagation constants of optical fiber structure with different radial mode numbers; (b) relationship between propagation constants of optical fiber structure and microsphere resonator

由式(1)、(2)计算得到不同微球直径时各阶径向模式的传播常数 $\beta_m$ ，如图 3(b)中实线所示。同时，在图 3(b)中以虚线绘制出图 3(a)的曲线，交汇点附近表明存在相位匹配的情况，光纤结构的传播常数用 $\beta_f$ 表示，即 $\beta_f = \beta_m$ 。从图 3(b)可以看到，相位匹配模式多发生高阶模式中，当微球半径为 17、20、24  $\mu\text{m}$  时，微

腔中将激发 WGM。对 WGM 来说，微球的半径减小，Q 值也会减小，同时较小尺寸的微球不便于操作，因此在实验过程中将会选取半径较大的微球。

在确定 HCF 内径和微球直径后，要进一步计算法诺共振的实现条件。为了将此结构中产生的法诺共振形象化，利用传输矩阵方法(TMM)<sup>[28]</sup>计算法诺共振光谱，公式为

$$P_R = \left| r \left( \frac{t - \tau t p^2}{1 - \tau t^2 p^2} \right)^2 \exp(2i\delta) - \frac{\sqrt{\tau} k^2 p}{1 - \tau t^2 p^2} \right|^2, \quad (3)$$

式中： $P_R$ 为归一化反射值； $\tau$ 为往返传输系数； $t$ 和  $k$  分别为透射系数和耦合系数，二者的关系可表示为  $t^2 + k^2 = 1$ ； $r$ 为空心光纤与空气相交界面处的振幅反射率，它满足的表达式为  $r = (n_h - n_a)^2 / (n_h + n_a)^2$ ，其中  $n_h$  和  $n_a$  分别表示 HCF 和空气的折射率； $p$  表示中间相位因子，其计算公式为  $p = \exp(i\theta/2)$ ，其中  $\theta$  为归一化频率，满足的表达式为  $\theta = 4\pi^2 n_{\text{eff}} R / \lambda$ ， $n_{\text{eff}}$  为微球腔的有效折射率， $R$  为微球半径， $\lambda$  为波长； $\delta$  和  $L$  分别为从微球和 HCF 之间的耦合区域到 HCF 腐蚀前端面的相位差和距离，满足公式  $\delta = \beta L$ ，其中  $\beta$  表示直径为 50  $\mu\text{m}$  的微球在高阶模式数下对应的传播常数。

在计算过程中，将透射系数  $t$  和往返传输系数  $\tau$  都设为 0.955，同时把 HCF 与空气相交界面处的振幅反射率  $r$  设为 0.25，分析归一化反射值随着相位差  $\delta$  的变化趋势。从式(3)可以看出，光谱随  $\delta$  的变化呈现重复性规律，变化周期为  $\pi$ ，同时光谱以不对称的形态存在，如图 4 所示。从图 4 可以看到，当归一化频率  $\theta$  在  $0 \sim \pi$  的范围内， $\delta$  的值在  $0.2\pi \sim 0.3\pi$  和  $0.6\pi \sim 0.7\pi$  范围时，光谱都呈现出较好的法诺态。因此在实际的计算中，使用的  $\delta$  值是加了  $n\pi$  ( $n=0, 1, 2, 3, \dots$ ) 的结果，为了获得一个容易操作的长度区间，计算中使用的  $n$  值范围为 171~286。可以看到，虽然共振谱线的深度有所差异，但是谱线的最大值和最小值出现的位置大致相同<sup>[29]</sup>，表明相位差主要影响光谱的形状，这无论对于洛伦兹线型还是法诺共振线型都是成立的，而相位差  $\delta$  可以通过 HCF 的腐蚀端面到耦合区域点的长度来控制。为了得到较好的法诺线型、提高斜率，实验中将 HCF 腐蚀端面到耦合区域的长度控制在 90~150  $\mu\text{m}$  范围内。

图 5(a)展示了  $\delta = 200.7\pi$  时不同温度下法诺线型移动的仿真结果，当外界温度改变时，微球谐振腔的热膨胀系数与热光系数就会发生变化，这就影响了微球谐振腔的尺寸和有效折射率。从图 5(a)可以看到，随着温度的升高，法诺线型发生了红移，而且在移动过程中，线型始终保持法诺形态，斜率几乎不变。对法诺共振峰的波长进行线性拟合，结果如图 5(b)所示，仿真得到的温度传感灵敏度为 26.58 pm/°C，线性度可以达到 0.9942。

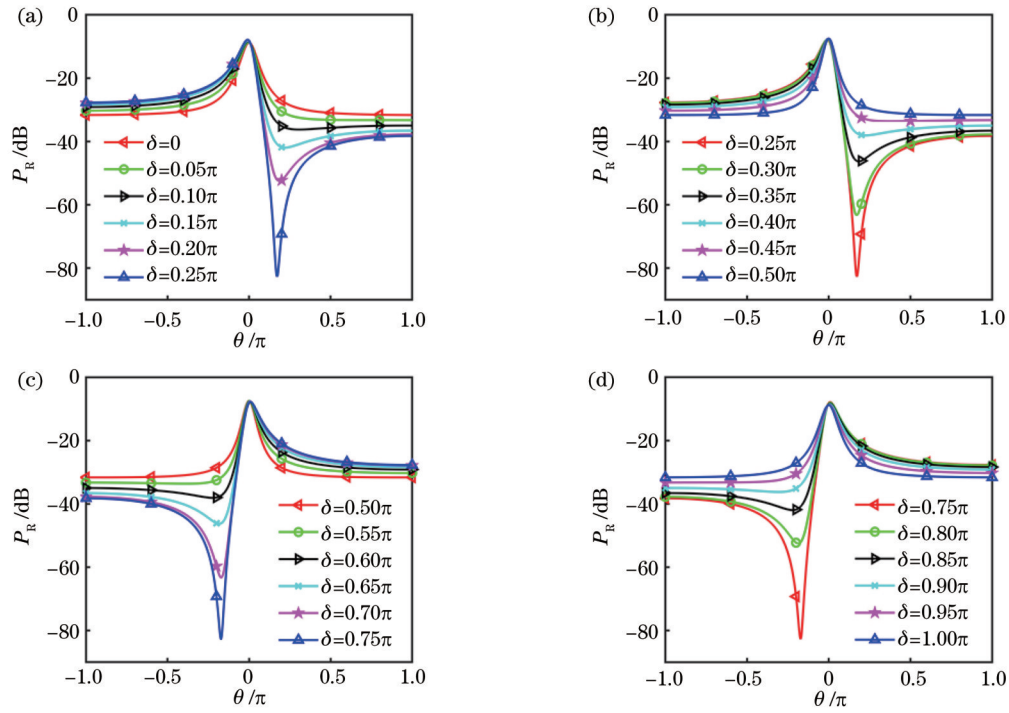


图 4  $\delta$  在不同范围内  $P_R$  与  $\theta$  的函数关系图像。(a)  $0 \sim 0.25\pi$ ; (b)  $0.25\pi \sim 0.50\pi$ ; (c)  $0.50\pi \sim 0.75\pi$ ; (d)  $0.75\pi \sim 1.00\pi$   
 Fig. 4 Images of the functional relationship between  $P_R$  and  $\theta$  in different ranges of  $\delta$ . (a)  $0 \sim 0.25\pi$ ; (b)  $0.25\pi \sim 0.50\pi$ ; (c)  $0.50\pi \sim 0.75\pi$ ; (d)  $0.75\pi \sim 1.00\pi$

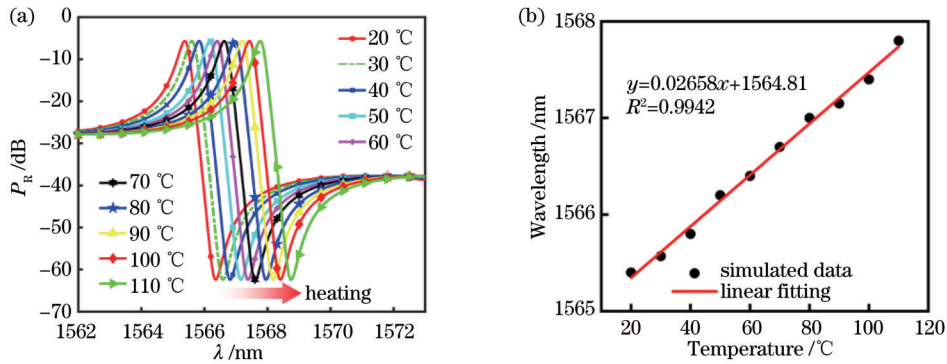


图 5 不同温度下法诺线型移动的仿真结果和法诺共振峰波长的线性拟合结果。(a) 仿真结果; (b) 线性拟合结果  
 Fig. 5 Simulation results of Fano line shape movement at different temperatures and linear fitting results of Fano resonance peak wavelengths. (a) Simulation results; (b) linear fitting results

### 3 在纤式谐振腔的制备与测试

在纤式 WGM 微球谐振腔的制备过程如图 6 所示。采用内径和外径分别为  $5 \mu\text{m}$  和  $125 \mu\text{m}$  的 HCF (TSP005150) 制备耦合结构, 将一段包层直径为  $125 \mu\text{m}$  的 SMF 与 HCF 熔接, 形成 SMF-HCF 结构。

在熔接过程中, 调整熔接时间和放电功率, 使 SMF 和 HCF 的熔接处塌陷, 形成锥形空腔, 如图 7(a) 所示。利用定长切割装置将 HCF 切割成  $2 \text{ mm}$  左右, 并将切割好的 HCF 垂直浸入体积分数为  $40\%$  的氢氟酸 (HF) 溶液中进行腐蚀操作。氢氟酸溶液会通过毛细效应逐渐进入内径, 因此靠近熔接区的 HCF 只会与少量液体接触并反应, 而 HCF 的端部接触到大量的氢

氟酸溶液, 相同时间内, HCF 端部反应速率更快, 腐蚀作用更强, 因此在 HCF 内径处形成一个长的空心圆锥体, 前端会产生一个大开口, 这使得一定直径的微球可以嵌入其中, 如图 7(b) 所示。此结构的腐蚀时间为  $33 \text{ min}$ , 最终腐蚀深度约为  $545 \mu\text{m}$ , 剩余端面壁厚为  $3 \mu\text{m}$ 。

在制备好耦合结构之后, 将该结构与一根锥形光纤探针分别固定在两个三维位移平台上, 通过控制三维位移台来进行微球的拾取和移动工作。将准备好的钛酸钡微球 (Cospheric BTGMS-4.25) 吸附在锥形光纤尖端, 通过调整三维位移平台来移动钛酸钡微球, 使其嵌入腐蚀后的 HCF 内部, 嵌入后的结构如图 7(c) 所示。由于内壁具有一定的摩擦力, 因此在没有较大外

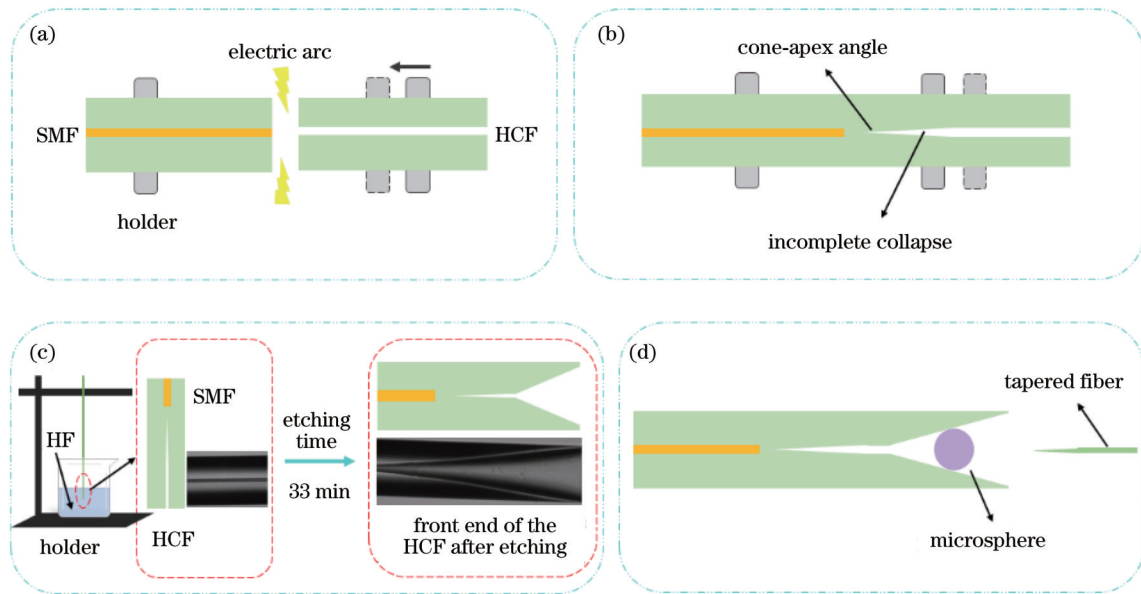


图 6 传感结构制备过程。(a)(b) SMF 与 HCF 熔接；(c) 腐蚀 HCF；(d) 微球置入 HCF 内部

Fig. 6 Sensing structure preparation process. (a)(b) Splicing of SMF and HCF; (c) etching of HCF; (d) placing the microsphere resonator into HCF

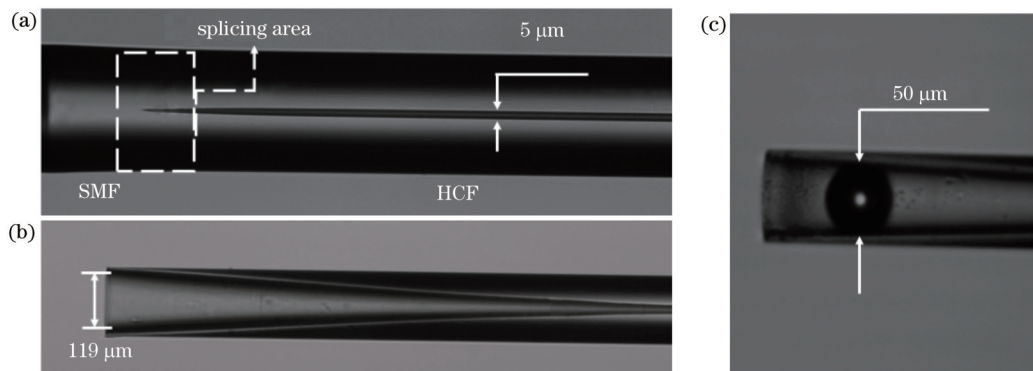


图 7 在纤式微球谐振腔的显微镜图像。(a) SMF 与 HCF 熔接处形成塌陷锥角；(b) HCF 腐蚀后形成圆锥体；(c) 微球嵌入后的谐振腔结构

Fig. 7 Microscope images of in-fiber microsphere resonator. (a) Collapse angle between SMF and HCF at splicing; (b) cone after etching the HCF; (c) microsphere embedded in resonator structure

力作用下,微球位置不会发生改变。整个操作过程需在显微镜下观察,所使用的光纤探头制备平台如图 8 所示。

在实验过程中,以锥形光纤探针为拾取和移动微球的工具,将直径为  $50\ \mu\text{m}$ 、折射率为 1.93 的钛酸钡微球(Cospheric BTGMS-4.25)嵌入 HCF 腐蚀的前端开口中。C+L 波段的 ASE 宽谱光源发出的光经过环形器入射到微腔中,反射回来的光再经过环形器被光谱分析仪(AQ6370D YOKOGAWA)接收,实时观察并采集反射光谱,如图 9(a)所示,可以看到反射谱中同时存在法诺共振线型与洛伦兹线型。空心光纤所支持的传导模式数量多,存在高阶模式,不同模式的传播常数不同,相位就不同,与 WGM 发生干涉时的相位差  $\delta$  则不同。由仿真结果可知, $\delta$  值变化会改变峰的形态,

因此,不同形态的干涉峰在光谱中混叠,没有呈现明显的周期性。图 9(b)所示为放大的法诺线型,其中显示了法诺共振的相关参数,法诺共振的宽度和对比度分别是最大值和最小值的横坐标值与纵坐标之差,斜率是最大值和最小值的比值<sup>[29]</sup>。根据式(3)可以得到不同相位差  $\delta$  情况下的反射图谱,相位差  $\delta$  可以通过 HCF 的腐蚀端面到耦合区域点的长度来控制,该法诺共振曲线的斜率为  $-99.3\ \text{dB/nm}$ 。

#### 4 传感实验结果与分析

所提出的内嵌式微球腔结构中使用的微球是由钛酸钡玻璃制成的,当外界温度发生变化时,由于热光效应和热膨胀效应,微球的折射率和半径会发生变化,进而引起共振峰的移动。温度变化时 WGM 波长移动<sup>[29]</sup>

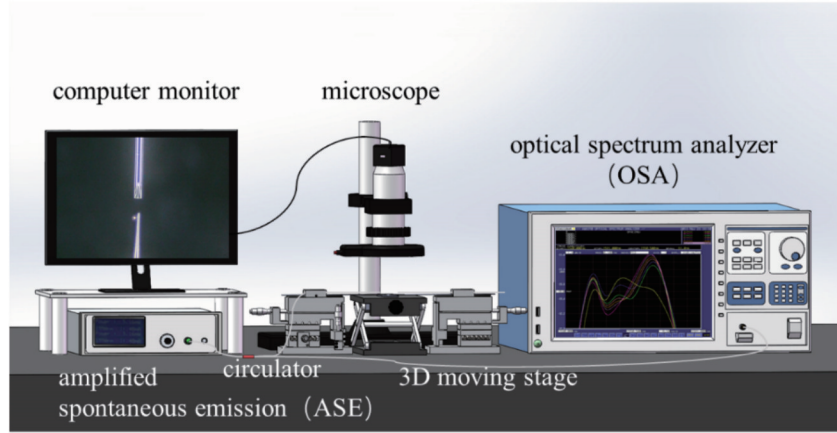


图 8 光纤探头制备平台

Fig. 8 Platform of optical fiber probe preparation

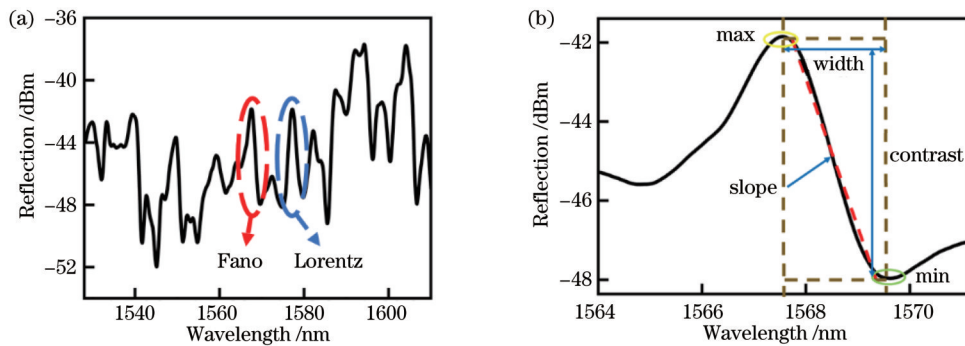


图 9 在纤式 WGM 微球谐振腔的反射光谱和放大的法诺共振及其参数定义。(a)反射光谱;(b)放大的法诺共振及其参数定义

Fig. 9 Reflection spectra of in-fiber WGM microsphere resonator and the enlarged Fano resonance and relevant parameter definitions.

(a) Reflection spectra; (b) the enlarged Fano resonance and relevant parameter definitions

可以表示为

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda \left( \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \right), \quad (4)$$

式中:  $T$  表示恒温恒湿箱中的温度;  $n_{\text{eff}}$  和  $R$  分别为微球的有效折射率与半径。

由于此谐振腔结构开放, 微球仍能与外界接触, 因此当外界环境的折射率改变时, 反射光谱也将发生变化。下面对此微腔的温度和折射率传感特性进行实验测试与分析。

#### 4.1 温度传感实验

测试微腔的温度特性时, 使用恒温恒湿箱 (WHTH-150-20-880) 来改变光纤结构周围的环境温度, 温度变化范围为 20~110 °C, 温度每变化 10 °C, 记录一次数据。在实验过程中, 随着温度升高, 利用光谱仪探测的法诺共振线型显示出红移的趋势, 如图 10(a) 所示。在光谱的移动过程中, 始终保持法诺形态, 斜率几乎不变, 这与前文中仿真得到的法诺线型移动趋势一致。

对法诺共振峰的波长进行拟合, 结果如图 10(b) 所示, 该微腔结构的温度传感灵敏度为 26.8 pm/°C, 与前文中仿真得到的灵敏度吻合, 这就证明微球中确实

激发了 WGM, 并且该模式参与到法诺共振中。从图 10(b) 可以看到, 该结构的光谱谐振峰的变化与温度变化之间呈现出良好的线性关系, 线性度达到 0.9997。

图 11(a) 展示了进行温度变化实验时得到的洛伦兹线型光谱的变化趋势, 可以看到, 随着温度升高, 洛伦兹线型显示出红移的趋势, 这和法诺线型的变化趋势相同, 对图 11(a) 所示的光谱进行线性拟合, 结果如图 11(b) 所示。

根据温度变化时 WGM 波长移动的原理可以得到某一波长  $\lambda$  处波长变化量  $\Delta\lambda$  和温度波动  $\Delta T$  之间的关系<sup>[29]</sup>, 即

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = (\alpha + \xi)\lambda, \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  和  $\xi$  分别为热膨胀系数与热光系数。对于钛酸钡材质的微球腔来说, 其热膨胀系数与热光系数分别为  $6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  与  $6.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ <sup>[30]</sup>, 通过计算得到的温度灵敏度为 10.9 pm/°C, 实验得到的洛伦兹线型光谱的温度灵敏度为 11.6 pm/°C, 与计算结果接近, 同时, 这个数值低于法诺线型光谱的温度灵敏度。这是因为洛伦兹线型是由 WGM 共振峰引起的, 而石英光纤的热膨胀系数低于钛酸钡。洛伦兹线型光谱的线性度为

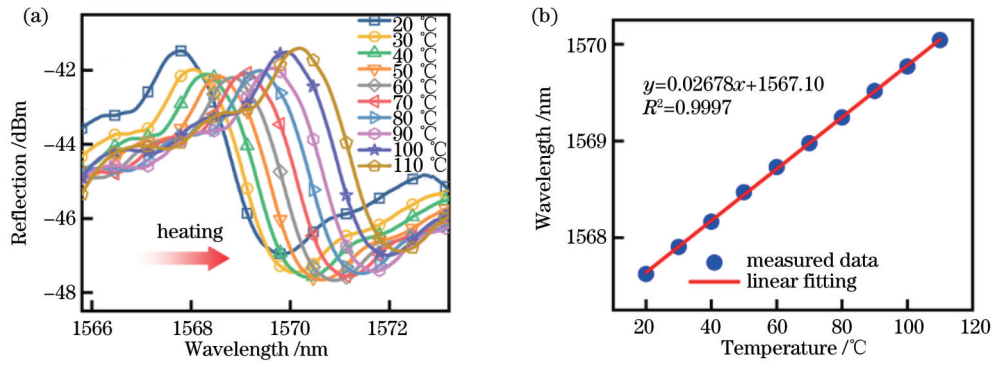


图 10 温度传感实验得到的法诺线型反射光谱和线性拟合结果。(a)反射光谱;(b)线性拟合结果

Fig. 10 Fano reflection spectra and linear fitting results in the temperature sensing experiments. (a) Reflection spectra; (b) linear fitting results

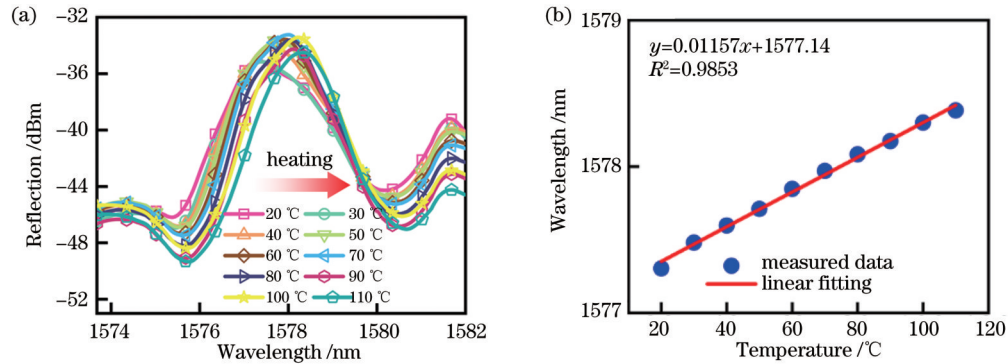


图 11 温度传感实验得到的洛伦兹线型反射光谱和线性拟合结果。(a)反射光谱;(b)线性拟合结果

Fig. 11 Lorentz reflection spectra and linear fitting results in the temperature sensing experiments. (a) Reflection spectra; (b) linear fitting results

0.9853,也低于法诺线型的线性度,这是因为共振峰中可能存在不同模式成分,而不同模式的热光系数略有差异。

#### 4.2 折射率传感实验

当所设计的微腔结构被用作折射率传感器时,将传感结构浸入配置好的氯化钠溶液中,并对反射光谱进行采集和分析。氯化钠溶液的折射率在 1.33534~1.35190 范围内,按照折射率将氯化钠溶液分为 6 组。在不同折射率溶液中采集到的反射光谱如图 12(a)所示,测得其中一对洛伦兹型共振峰的自由光谱范围(FSR)为 5.12 nm。由于浸在溶液中,HCF 的端面处的菲涅耳反射率减小,反射光强已经不足以与在微球内部激发 WGM 的光束发生干涉来形成法诺光谱形态,因此,法诺线型退化为洛伦兹线型。随着溶液的折射率升高,反射率逐渐减小,反射光强度降低。一般情况下,由于倏逝场改变了 WGM 的相位,共振峰波长会因周围折射率变化而改变,但是腐蚀得到的圆锥体空腔均匀且形状规则,因此在微球嵌入之后的贴合效果很好,球与锥顶角之间形成近似密闭的空腔,使得大部分球表面接触不到溶液,所以倏逝场对相位的影响小,不足以让波长发生能够被光谱仪分辨的移动量。

对 1577 nm 波长处的峰值强度变化进行拟合,发

现折射率传感灵敏度为  $-244.97 \text{ dB/RIU}$ ,线性度为 0.9724,如图 12(b)所示。

对反射光谱进行快速傅里叶变换(FFT),获得的空间频谱如图 13(a)所示,该空间频谱的主频峰值为  $0.188 \text{ nm}^{-1}$ ,在  $0.438 \text{ nm}^{-1}$  处也出现了一个较低的峰值,但是其强度太小,在计算中可以忽略不计。因此,该谐振腔中有一种最有可能激发 WGM 的光路,如图 13(b)所示,即在 HCF 中传播的发散光从一侧的切向路径耦合进入微球,沿着微球表面顺时针方向传播超过两个半个周期,然后从另一侧沿着切向路径离开微球。

FSR 满足公式  $d_{\text{FSR}} = \lambda^2/P$ ,其中  $P$  为光程差(OPD)。  $0.188 \text{ nm}^{-1}$  处的峰值对应的 FSR 为 5.32 nm,该数值与反射光谱的测量值相对应,计算得到的 OPD 数值为 466.28 nm。对于 WGM 微球谐振腔来说,满足  $P_{\text{WGM}} = n\pi D$ ,其中  $n$  和  $D$  分别为微球腔的折射率与直径。图 13(b)所示的耦合光路 OPD 是通过  $l_1$  的切向耦合进出微球的光和沿着  $l_2$  往返路径的光之间的 OPD<sup>[25]</sup>,可以近似表达为

$$P' = 2n_1 l_1 + 2P_{\text{WGM}} + n_2 \frac{\Psi}{360} \pi D - 2n_1 l_2, \quad (6)$$

式中: $n_1$ 和 $n_2$ 分别表示 HCF 的包层折射率和微球腔的

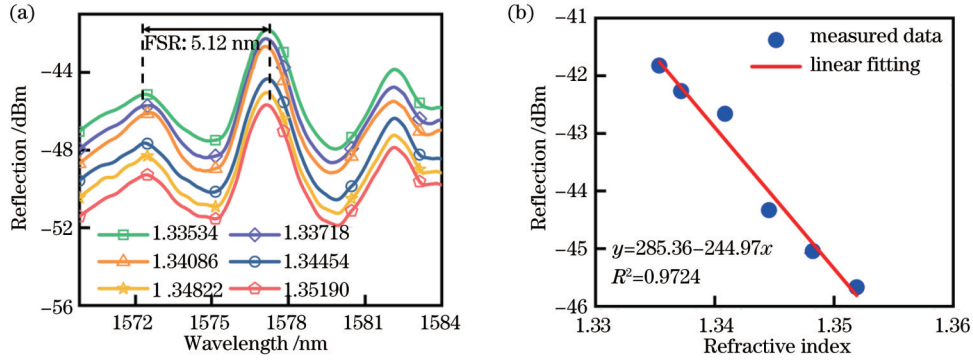


图 12 折射率传感实验的反射光谱和线性拟合结果。(a)反射光谱;(b)线性拟合结果

Fig. 12 Reflection spectra and linear fitting results in the refractive index sensing experiments. (a) Reflection spectra; (b) linear fitting results

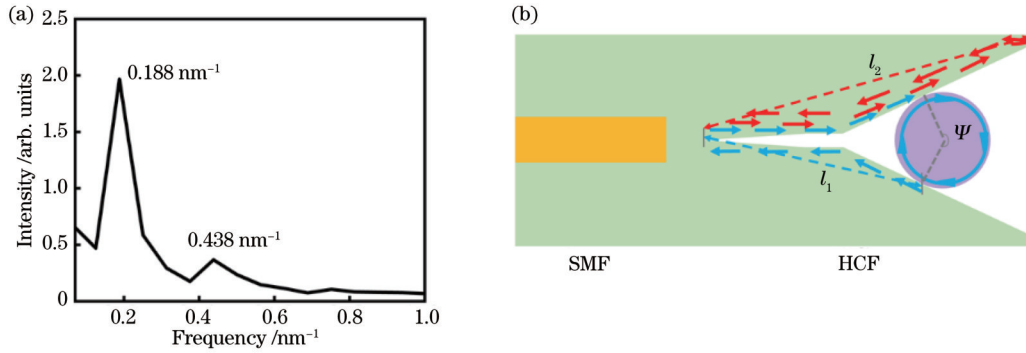


图 13 通过FFT获得的空间频谱和在纤式WGM微球谐振腔的耦合光路示意图。(a)空间频谱;(b)耦合光路示意图

Fig. 13 Spatial frequency spectrum obtained by FFT and schematic of coupled lightpath of in-fiber WGM microsphere resonator.

(a) Spatial frequency spectrum; (b) schematic of coupled lightpath

折射率;  $l_1$  表示熔接锥角到微球腔与 HCF 耦合区的距离;  $l_2$  表示熔接锥角到 HCF 端面的距离;  $\Psi$  表示两条切线之间的角度。在式(6)中,  $\Psi > 180^\circ$ , 因此计算得到的  $P'$  为 462.4 nm, 可以看到两个结果的差值相对较小, 表明该耦合光路确实存在, 在微球腔内部激发了 WGM。

## 5 结 论

提出一种能够激发微球谐振器中的 WGM 模式的在纤式光纤耦合器, 并对其温度与折射率的传感特性进行了探究。研究了不同参数对法诺共振光谱形态的影响, 通过仿真研究了光纤结构与微球直径之间借助传播常数的匹配来形成法诺线型的情况, 计算出能得到较好法诺线型的理论值  $L$  的区间, 这对于后续的实验操作具有指导意义。通过实验证明了所设计结构具备的传感特性, 其温度灵敏度为 26.8 pm/°C, 折射率灵敏度为 -244.97 dB/RIU。该器件结构紧凑、加工简单、不需要精确对准, 在传感应用和光开关领域具有一定的潜力。

## 参 考 文 献

[1] Vollmer F, Braun D, Libchaber A, et al. Protein detection by optical shift of a resonant microcavity[J]. Applied Physics

Letters, 2002, 80(21): 4057-4059.

[2] Li B B, Brawley G, Greenall H, et al. Ultrabroadband and sensitive cavity optomechanical magnetometry[J]. Photonics Research, 2020, 8(7): 1064-1071.  
 [3] Hou F Y, Zhang X B, Wang Z J, et al. Magnetic fluid infiltrated microbottle resonator sensor with axial confined mode [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(5): 6802709.  
 [4] Silva-Alvarado E C, Martinez-Rios A, Gallegos-Arellano E, et al. Tunable filter based on two concatenated symmetrical long period fiber gratings as Mach-Zehnder interferometer and its fiber lasing application[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 149: 107824.  
 [5] Zhu S, Liu Y, Shi L, et al. Tunable polarization beam splitter based on optofluidic ring resonator[J]. Optics Express, 2016, 24 (15): 17511-17521.  
 [6] Liu Y, Yang H H, Lu Y L, et al. A whispering gallery mode strain sensor based on microtube resonator[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(4): 199-204.  
 [7] 刘笑尘, 谢严, 陈溢琦, 等. 光纤耦合双微球谐振腔及其模式分裂特性[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306017.  
 Liu X C, Xie Y, Chen Y Q, et al. Fiber coupled double microsphere resonator and its mode splitting characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306017.  
 [8] Liu B Y, Geng Y, Zhang Q, et al. All-optical carrier recovery for self-homodyne detection via injection locked Brillouin laser in whispering-gallery-mode microcavity[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(11): 111901.  
 [9] Liang C Z, Zhang H, Wang Y J, et al. Laser-tuned whispering gallery modes in silica micro-bubble resonator integrated with iron oxide particles[J]. Optoelectronics Letters, 2021, 17(3):



- 129-133.
- [10] 王亚平, 王秀翊, 王璞. 回音壁模式光学微腔识别细胞类型[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 0207028.  
Wang Y P, Wang X H, Wang P. Identifying single cell types via whispering gallery mode optical microcavities[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(2): 0207028.
- [11] Yin Y H, Niu Y X, Dai L L, et al. Cascaded microbottle resonator and its application in add-drop filter[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 7103810.
- [12] Zhou Z H, Chen Y, Shen Z, et al. Tunable add-drop filter with hollow bottle-like microresonators[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 7101607.
- [13] Lu X Y, Rao A, Moille G, et al. Universal frequency engineering tool for microcavity nonlinear optics: multiple selective mode splitting of whispering-gallery resonances[J]. Photonics Research, 2020, 8(11): 1676-1686.
- [14] 温钦, 秦晋辉, 周恒, 等. 回音壁模式光学微腔的激发模式控制[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1919001.  
Wen Q, Qin J H, Zhou H, et al. Controllable excitation of whispering gallery mode micro-rod resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1919001.
- [15] Oraevsky A N. Whispering-gallery waves[J]. Quantum Electronics, 2002, 32(5): 377-400.
- [16] Cai L, Pan J Y, Hu S. Overview of the coupling methods used in whispering gallery mode resonator systems for sensing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105968.
- [17] Vogt D W, Jones A H, Leonhardt R. Free-space coupling of terahertz whispering-gallery modes[C]//2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 1-6, 2019, Paris, France. New York: IEEE Press, 2019.
- [18] Liu X, Wang D N. Optical dual-microsphere whispering-gallery-mode resonator coupled by a pair of tapered fibers[J]. Optik, 2021, 242: 167187.
- [19] 赵庆玲, 冯胜飞. 多芯光纤端面上对称耦合双环微腔气体传感特性研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2022, 43(1): 28-33.  
Zhao Q L, Feng S F. Optical characteristics and vapor sensing applications of symmetrically coupled double-ring microcavities on the tip of multi-core optical fiber[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2022, 43(1): 28-33.
- [20] Knight J C, Cheung G, Jacques F, et al. Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper[J]. Optics Letters, 1997, 22(15): 1129-1131.
- [21] Zhang M, Yang W L, Tian K, et al. In-fiber whispering-gallery mode microsphere resonator-based integrated device[J]. Optics Letters, 2018, 43(16): 3961-3964.
- [22] Wang H Z, Lan X W, Huang J, et al. Fiber pigtailed thin wall capillary coupler for excitation of microsphere WGM resonator[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15834-15839.
- [23] Kosma K, Zito G, Schuster K, et al. Whispering gallery mode microsphere resonator integrated inside a microstructured optical fiber[J]. Optics Letters, 2013, 38(8): 1301-1303.
- [24] Wang D N, Chen W P, Liu J, et al. Whispering gallery mode microsphere resonator with microsphere-microsphere coupling[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 46: 147-151.
- [25] Liu J, Chen W P, Wang D N, et al. A whispering-gallery-mode microsphere resonator on a no-core fiber tip[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(6): 537-540.
- [26] 甘雪涛, 赵建林. 光学腔的共振线型[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823007.  
Gan X T, Zhao J L. Resonance lineshapes in optical cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823007.
- [27] Hanumegowda N M, Stica C J, Patel B C, et al. Refractometric sensors based on microsphere resonators[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(20): 201107.
- [28] Wang J W, Zhang X B, Yan M, et al. Embedded whispering-gallery mode microsphere resonator in a tapered hollow annular core fiber[J]. Photonics Research, 2018, 6(12): 1124-1129.
- [29] Zhang X B, Yang Y, Bai H W, et al. Theoretical aspects and sensing demonstrations of cone-shaped inwall capillary-based microsphere resonators[J]. Photonics Research, 2017, 5(5): 516-520.
- [30] 孙航, 刘笑尘, 王梓杰, 等. 毛细管内嵌微球谐振腔的温度传感特性研究[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 926-931.  
Sun H, Liu X C, Wang Z J, et al. Temperature sensing characteristics of a microsphere resonator embedded in a capillary[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 926-931.

## An In-Fiber Whispering-Gallery-Mode Microsphere Resonator and Its Sensing Characteristics

Yin Qiyu<sup>1,3</sup>, Cai Lu<sup>1,3\*</sup>, Li Shangwen<sup>1,3</sup>, Zhao Yong<sup>1,2,3\*\*</sup>

<sup>1</sup>College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China;

<sup>3</sup>Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei, China

### Abstract

**Objective** The whispering-gallery-mode (WGM) microcavity sensor has the advantages of a small mode volume and a high quality ( $Q$ ) factor, and thus it can be applied in high-sensitivity sensing of various physical quantities. Now, common coupling methods for exciting WGMs include prism coupling, tapered fiber coupling, and fiber end coupling. The main disadvantage of prism coupling is that the system is bulky and not easy to be applied to sensing. Tapered fiber coupling is the most common method, whose coupling efficiency can reach 99%. However, the waist diameter of the tapered fiber is too small, and the effective waist diameter should be less than 2  $\mu\text{m}$  to effectively excite WGMs, which makes the overall

structure fragile. The fiber end coupling features low efficiency and poor stability, and the control of the coupling angle is difficult. In this paper, an in-fiber WGM microsphere resonator is proposed, which is composed of single-mode fiber (SMF) and hollow-core fiber (HCF). The inner diameter of HCF is small, and the light intensity reflected by the fiber end after corrosion is relatively large, which can effectively improve the stability of the reflection spectrum and play a role in temperature and refractive index sensing.

**Methods** First, we use simulations to analyze the phase matching of the coupling between microsphere cavities of different sizes and fiber structure and obtain the influencing factors of the spectral shape. It is concluded that the phase difference  $\delta$  can be changed by the control over the distance between HCF etching end and coupling region to obtain a better Fano profile and increase the slope. Second, in device preparation, the phases of SMF and HCF are fused, and the HCF is cut into a segment of about 2 mm by a fixed-length cutting device. The segmented HCF is then vertically immersed in a hydrofluoric acid (HF) solution with a volume fraction of 40% for etching. Third, a tapered fiber is used as a probe to pick up and move the barium titanate microspheres, which are embedded in the HCF to form a fiber-type resonator structure. In the experiment, it is found that the WGM excited in the microsphere cavity interacts with the reflected light at the HCF end, which results in Fano resonance. The resonator has both temperature and refractive index sensing capabilities. The conclusions obtained by calculation and simulation are consistent with the experimental results.

**Results and Discussions** The optical fiber simulation model is built by the beam propagation method. When the fiber length is fixed, a smaller inner diameter of HCF means stronger light intensity reflected by the fiber end (Fig. 2). In addition, the appropriate size of microspheres is selected by simulation to excite WGMs (Fig. 3). The simulation shows that the phase difference  $\delta$  is the main factor affecting the spectral shape, and  $\delta$  can be changed by the control over the distance between HCF etching end and coupling region to obtain a better Fano profile and increase the slope (Fig. 4). During the sensing experiment, the WGM excited in the microsphere cavity participates in the Fano resonance with a slope of  $-99.3$  dB/nm (Fig. 9), and the cavity can sense the temperature and refractive index. In the temperature sensing experiment, the temperature sensitivity of Fano line of the resonator is  $26.8$  pm/ $^{\circ}$ C (Fig. 10), which is consistent with the simulation results obtained in the previous section (Fig. 5) and is higher than the sensitivity of the Lorentz line (Fig. 11). In the refractive index sensing experiment, the Fano line is degraded to the Lorentz line, and the refractive index sensitivity is  $-244.97$  dB/RIU (Fig. 12). The calculation method of the optical path difference can be used to confirm that WGM is excited inside the microsphere cavity (Fig. 13).

**Conclusions** In this paper, an in-fiber WGM microsphere resonator is fabricated and investigated, and the temperature and refractive index sensing characteristics are studied. The influence of different parameters on the shape of the Fano resonance spectrum is explored. Through simulation, the formation of the Fano profile is researched by the matching of the fiber structure and microsphere diameter with the help of the propagation constant. Moreover, the interval of the theoretical value  $L$  that can lead to a better Fano profile is calculated, which is of guiding significance for subsequent experimental operations. The experiments demonstrate the temperature and refractive index sensing characteristics of the designed structure, with temperature sensitivity of  $26.8$  pm/ $^{\circ}$ C and reflective index sensibility of  $-244.97$  dB/RIU. The resonator is stable, compact, and simple to process, and this in-fiber structure is expected to be applied in complex sensing environments.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensor; in-fiber; whispering gallery mode; microsphere cavity